

天津市仪器仪表学会第二届年会

优秀论文选集

天津市仪器仪表学会

一九八一年三月

前 言

天津市仪器仪表学会第二届年会于一九八〇年十二月十五日至十七日在天津市科学会堂召开。会上共宣读论文86篇其中包括：电磁测量和信息处理、过程检测、光学仪器、分析仪器、照像电影机械、工艺等各专业论文。

经参加年会活动的会员民主评议及各专业分会委员会的讨论研究，从其中选出26篇论文，做为本届年会的优秀论文。

本论文集是从优秀论文中经学会推荐的具有代表性和内容适应性较广泛的十三篇论文。

其中鉴于作者编者水平所限错误之处在所难免望广大读者给予批评指正。

3-1-5-2/09

天津市仪器仪表学会

一九八一年三月



目 录

激光技术在测量低阻低寿命半导体材料上的应用.....	河北工学院	刘锡安 (1)
光学信息处理的混合系统.....	天津大学	张以谟 (11)
红外分光光度计的发展.....	光学仪器公司	刁永言 (25)
功率因数的快速测量装置.....	河北工学院 陆俭国	杨乐玉 (31)
P N结数字温度计.....	天津大学	王桂珠 (38)
D X D型显示记录仪电路设计及特点.....	天津自动化仪表六厂	赵素青 (43)
光电码盘位置检测器.....	天津电气传动设计研究所 应祖德	詹增修 (55)
以相差系数变化表为依据制定相差平衡方案.....	天津第二光学仪器厂	李大山 (63)
照像机正确曝光问题.....	天津照像机厂	屠传炎 (66)
仪表可靠性浅论.....	天津石油化纤厂 田守明 于国亭	张梦阳 (71)
冲裁间隙的探讨与商榷.....	天津自动化仪表六厂	杨友志 (77)
三台冲床联合作业自动线在设计使用中的问题及改进办法.....	天津微电机厂	刘全璞 (92)
工业企业劳动定额管理.....	天津矿山仪器厂	于振庭 (110)

激光技术在测量低阻低寿命 半导体材料上的应用

刘锡安

摘要: 本文介绍一套低电阻率低寿命硅单晶非平衡少数载流子寿命测试设备。该设备采用调Q 掺钕钇铝石榴石激光器构成脉冲光源,其脉冲宽度可控制在几十毫微秒到100毫微秒,脉冲功率大于 5×10^7 瓦。可测最低电阻率0.1欧姆·厘米。寿命为 10^{-7} 秒数量级的少子寿命。

一、前言

随着电子工业的发展,尤其是电子数字计算机的高速发展,要求大规模集成电路相应的跟上去,从而对硅单晶质量提出更高的要求。而大规模集成电路所用的硅单晶是低电阻率低寿命的,因而在检测参数上就提出来了新的课题,也就是低电阻率硅单晶寿命的测试问题。我们针对这个问题从理论上进行了分析,找出解决问题的方向,并研制出来了测试设备。

寿命测试的各种方法之中,光电导衰退法的理论分析比较清楚,操作又简单,因此,可以作为精密测量的方法,这已经是在国内外得到公认的。我国冶金部确定将光电导衰退法定为测量硅单晶寿命的部颁标准。在测量电阻率为10欧姆·厘米以上,寿命为20微秒以上的测量系统中采用脉冲氙灯作光源是个很理想的脉冲光源,这类设备我们在1972年研制过并为生产单位试制几台,在生产实践过程中证明性能良好。但是,要测量更低电阻率,更低寿命的少子寿命测试仪,多年来在理论上和设备方面(用光电导衰退法)一直没有得到很好地解决。我们在1975年结合天津市大规模集成电路的会战,对这个项目进行了研究。同年搞出了样机经过实验达到了预期结果。现将这方面的工作整理发表,以供有关单位参考。

要测量更低电阻率,由于光强所限,注入水平低会使信号变小,准确度降低,甚至由于噪声的干扰而无法测量,同时对更低寿命样品测量时被氙灯的余辉引起注入畸变。分析的结果认识到氙灯作为脉冲光源是有局限性的,而不能满足低电阻率,低寿命测量的需要。所以解决信噪比成为主要矛盾了,信号和噪声这两方面信号是主要的,因为设备已把噪声压到最低,只有使信号加大才能解决,这是经过反复实验得出来的结论。我们列举了各种方案最后选定加大光强提高注入水平,减小脉宽消除余辉的影响。确定采用调Q的掺钕钇铝石榴石激光器作为脉冲光源,通过计算和实验结果、技术指标,光源脉冲宽度可控制到几十毫微秒,可测寿命为 10^{-7} 秒数量级,投射到样品表面上的光子流密度大于 10^{24} [光子·厘米 $^{-2}$ ·秒 $^{-1}$]故可测电阻率为 10^{-1} 欧姆·厘米的硅单晶寿命。

此设备准备分两次向读者介绍,本文着重讨论在允许注入比条件下,提高非平衡载流子激发率的理论分析和采取的技术措施,以满足低电阻率低寿命硅单晶少子寿命的测试。另一篇文章将介

绍有关具体设备中主要环节的理论分析和技术设计。

二、基本原理

(一) 半导体材料寿命

半导体中,因某种外界原因(如光照射、热、电注入等)载流子浓度便会偏离其平衡值;当外界原因除去之后,经过一定的时间,载流子浓度又能恢复到平衡值,这种过程称之为复合;这种复合所需要的平均时间即定义为少数载流子的寿命(以后简称寿命),一般用 τ 来表示。

在n型半导体中 n (电子浓度) $\gg p$ (空穴浓度),电子称为多数载流子,空穴称为少数载流子。在P型半导体中 $P \gg n$,空穴称为多数载流子,电子称为少数载流子。在热平衡状态下,少数载流子具有一定的浓度,且与多数载流子浓度相对平衡,但当有外界激发时,少数载流子浓度相对于其平衡值可有明显的偏离,通常称较平衡状态多出的少数载流子为非平衡少数载流子。在半导体器件中,这种由外界注入的非平衡少数载流子起着重要的作用,因此,测量硅单品的寿命具有重要意义,故定为硅单品常规参数之一。

对n型半导体,若设激发所引起的少数载流子的增加量为 ΔP ,由定义得

$$\tau_p = \frac{\Delta P}{R} \quad (1)$$

式中 R 为复合率, τ_p 是与多数载流子 n 有关的量, τ_p 越小,非平衡载流子的复合率就越大,也就是非平衡载流子复合得越快,所以寿命的值标志着非平衡载流子复合的快慢。

在激发停止后, ΔP 随时间变化为

$$\frac{d(\Delta P)}{dt} = -\frac{\Delta P}{\tau_p} \quad (2)$$

(2)式成立的一个必要条件为 ΔP 足够小,这时 τ_p 才是常数,它才是少数载流子的寿命,所以对于n型半导体注入的少数载流子为空穴,对(2)式积分可得

$$\Delta P = \Delta P_0 e^{-\frac{t}{\tau_p}} \quad (3)$$

式中 ΔP_0 为激发开始($t=0$)时的 ΔP 值,

所以寿命 τ_p 的物理意义为当 ΔP_0 衰退到 $\frac{1}{e}$ 所需

时间, e 为自然对数的底。

(二) 半导体材料寿命测试原理

如图1所示,为直流光电导衰退法的示意图,其中, R_s 为样品电阻, R_L 为恒流源 E_0 的内阻。当光照射到 R_s 上时,由样品电阻 R_s 上取信号,任何时候都有:

$$V_s = IR_s \quad (4)$$

在无光照时其上的电压为:

$$V_{s0} = I_0 R_{s0} \quad (4)$$

这里, V_{s0} 、 I_0 、 R_{s0} ,为无光照时相应的电压、电流和电阻。当受光照时,样品电压变化了 ΔV_s ,

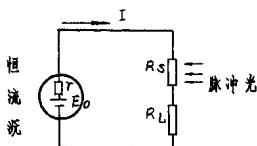


图1 直流光电导衰退法电路示意图

$$\Delta V_s = I_0 \Delta R_s + R_{s0} \Delta I \quad (5)$$

式中, ΔI 为由光照样品而引起的回路中的电流变化, ΔR_s 为样品电阻的变化。(5) 式除以 (4) 式得:

$$\frac{\Delta V_s}{V_{s0}} = \frac{\Delta R_s}{R_{s0}} + \frac{\Delta I}{I_0} \quad (6)$$

因为:

$$I = \frac{E_0}{R_L + R_s + r} \quad (7)$$

式中 R_L 为取电阻, 即测试信号从 R 两端取出, 也称为恒流电阻, r 为电源内阻, E_0 为直流电动势, 所以

$$\Delta I = \frac{-E_0 \Delta R_s}{(R_L + R_s + r)^2} = -I \frac{\Delta R_s}{(R_L + R_s + r)}$$

$$\text{即 } \frac{\Delta I}{I} = - \frac{\Delta R_s}{R_L + R_s + r} \quad (8)$$

当满足注入条件时, (8) 式中的 R_s 被 R_{s0} 代替, (7) 式中的 R_s 也被 R_{s0} 所代替, I 以 I_0 代替于是有:

$$\frac{\Delta I}{I_0} = - \frac{R_{s0}}{(R_L + R_s + r)} \cdot \frac{\Delta R_s}{R_{s0}} \quad (9)$$

(9) 式代入 (6) 式得

$$\frac{\Delta V_s}{V_{s0}} = \frac{\Delta R_s}{R_{s0}} \left[\frac{R_L + r}{R_L + R_s + r} \right] \quad (10)$$

除了小注入之外, 如果再加上恒流条件, 即 $R_L \gg R_{s0} + r$ 条件, 则上式可写为

$$\frac{\Delta V_s}{V_{s0}} = \frac{\Delta R_s}{R_{s0}} \quad (11)$$

$$\text{又由于 } R_s = \frac{1}{G_s} \quad (12)$$

式中 G_s 为样品电导。

$$\text{故 } \frac{\Delta R_s}{R_s} = - \frac{\Delta G_s}{G_s}$$

$$\text{在注入比很小时变为 } \frac{\Delta R_s}{R_{s0}} = - \frac{\Delta G_{s0}}{G_{s0}} \quad (13)$$

从上面分析可见, 当从样品上取信号时, 在直流光电导衰退法中, 若满足小注入和恒流条件, 在样品上电导的变化 ΔG 是和其上电压变化成正比的。这是因为取样电阻 R_L 上的电压 ΔV_L 即为所取的信号, 即

$$\Delta V_L = R_L \cdot \Delta I \quad (14)$$

$$\text{及 } V_L = R_L I \quad (15)$$

$$\text{所以 } \frac{\Delta V_L}{V_L} = \frac{\Delta I}{I} \text{ 在小注入有}$$

$$\frac{\Delta V_L}{V_L} = \frac{\Delta I}{I_0} \quad (16)$$

将 (9) 式代入 (16) 式得:

$$\begin{aligned}\frac{\Delta V_L}{V_L} &= -\frac{R_{so}}{(R_L + R_{so} + r)} \cdot \frac{\Delta R_s}{R_{so}} \\ &= -\frac{R_{so}}{(R_L + R_{so} + r)} \cdot \frac{\Delta G_s}{G_{so}}\end{aligned}\quad (17)$$

(17) 式表明, 当信号从取样电阻 R_L 上取出时只需要满足小注入而无恒流条件, 即可看到电压衰退信号, 且其衰退常数即为寿命。如果样品电阻足够大并且满足 $R_{so} \gg R_L + r$ 条件, 则 (17) 式变为

$$\frac{\Delta V_L}{V_L} = -\frac{\Delta R_s}{R_{so}} \quad (18)$$

这和样品上取信号, 且在恒流下的 (11) 式相似, 但信号的符号相反, 而其相对变化的幅度相同。

从以上分析可知。

$$\Delta V \propto \Delta G \propto \Delta P = \Delta P e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (19)$$

因此, 在具体测量时, 我们是取的电压信号, 即

$$\Delta V = \Delta V_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (20)$$

从示波器的荧光屏上所观察到 $\frac{\Delta V_0}{e}$ 所对应的时间 τ 即为所测样品的寿命。如图 2 所示。

(三) 激发非平衡载流子能量的分析

由上面分析可见, 要加大信号, 即加大 ΔV , 就必须加大 ΔR_s , 因此就要求增强光源的强度。也就是通过增强光源的能量来提高少子注入水平。针对这一问题下面对氙灯作为脉冲光源的局限性加以分析:

我们以 10^{-1} 欧姆·厘米的 N 型硅单晶为例作粗略的计算。它的多数载流子浓度由图 3 查得约为 1×10^{17} 厘米⁻³ 量级, 在小注入条件下 (一般取注入比小于 1%), 需要由光激发非平衡载流子浓度为 10^{15} 厘米⁻³。设寿命为 1 微秒, 当假设样品均匀吸收, 量子效率为 1, 不计表面反射时, 可得激发率为

$$R = \frac{\Delta P}{\tau} = \frac{1 \times 10^{15}}{1 \times 10^{-6}} = 1 \times 10^{21} [\text{厘米}^{-3}, \text{秒}^{-1}]$$

单位时间, 通过单位面积的光子数等于激发率和样品厚度的乘积, 因而可得样品表面处的光子流密度 ψ 为

$$\psi = 1 \times 10^{21} \times 20 \times 10^{-4} = 2 \times 10^{21} [\text{光子} \cdot \text{厘米}^{-2} \cdot \text{秒}^{-1}]$$

那末, 光源的能量 W 应为

$$W = \frac{S \cdot E \cdot t}{\eta}$$

其中

$$E = \frac{\psi \cdot h \cdot c}{\lambda}$$

$$\therefore W = \frac{S \cdot \psi \cdot h \cdot c \cdot t}{\eta \lambda} \quad (20)$$

电阻率 ρ ($\Omega \cdot \text{cm}$)

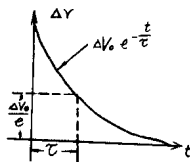


图2 少子寿命衰减曲线

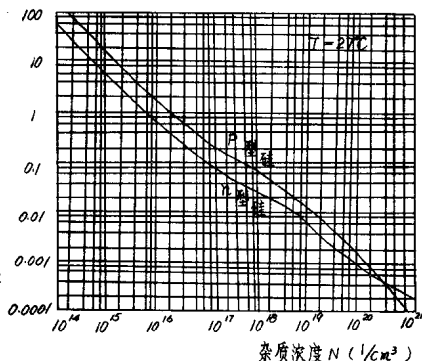


图3 室温时硅电阻率随杂质浓度变化的曲线

式中 S 是光投射到样品上的面积, ψ 为光子流密度, h 为普朗克常数, t 为光脉冲宽度, η 为发射光子的有效利用率, λ 为光的波长。

其中 η 对于氙灯, 由于所发光是白光, 它含 1.1 微米的红外光仅占全部光能量的 3% 左右, 这 3% 中能被样品吸收 (经聚光后投射到样品表面上的) 仅是 1% , 故总的效率为万分之三; 脉冲宽度 t , 对氙灯最窄能做到 3.5×10^{-6} 秒, C 为光速 ($= 3 \times 10^{10}$ 厘米/秒), $\lambda = 1.1 \times 10^{-6}$ 厘米, 将具体数代入 (20) 中

$$W = \frac{20 \times 10^{21} \times 2 \times 6.62 \times 10^{-27} \times 3 \times 10^{10} \times 3.5 \times 10^{-6}}{3 \times 10^{-4} \times 1.1 \times 10^{-6}} \\ = 842.5 \times 10^6 \text{ [尔格]}$$

对于 10^{-1} 欧姆·厘米, 1 微秒硅单晶, 在满足注入比条件下, 激发非平衡载流子所需要的光源能量应为 842.5×10^6 尔格。氙灯的脉冲宽度是 3.5×10^{-6} 秒, 所以功率 P 应为

$$P = \frac{W}{t} = \frac{842.5 \times 10^6}{3.5 \times 10^{-6}} = 2.41 \times 10^7 \text{ 瓦}$$

也就是光源的功率最低为 2.41×10^7 瓦才能激发出所需的非平衡载流子数。

下面计算氙灯最大可能功率:

脉冲氙灯所产生的平均功率为

$$P_{\text{av}} = \frac{1}{2} CV^2 f t^{-1} \quad (21)$$

式中C即图4中C₂是储能电容, C = 0.022微法, V为直流高压, V = 5千伏, f为闪频, 具体设备 f = $\frac{1}{秒}$, t是脉宽, t = 3.5 × 10⁻⁶秒。

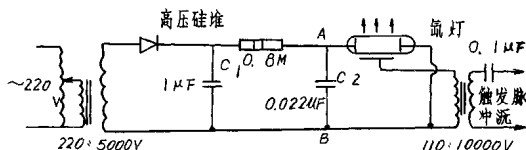


图4 脉冲光源电路图

所以功率为

$$P_{xc} = \frac{\frac{1}{2}(0.022 \times 10^{-6}) \times (5 \times 10^3)^2 \times 1}{3.5 \times 10^{-6}} = 7.9 \times 10^4 \text{ 瓦}$$

通过计算可见, 利用氙灯作光源, 最高能产生功率为7.9 × 10⁴瓦, 而需要的最低功率为2.41 × 10⁷瓦, 所以氙灯远远满足不了测量低阻低寿命的需要。

(四) 激光的特点

激光器和普通光源有显著的不同, 在掺钕钇铝石榴石人造晶体, 当受激后, 大量钕离子从基态跃迁到亚稳态的能级上。此时如果有频率为 $\gamma_0 = \frac{E_2 - E_1}{h}$ 的光通过晶体, E₂(亚稳态)能级上大量钕离子, 跳回到E₁(基态)能级, 同时放出波长 $\lambda = \frac{\gamma_0}{C} = 1.06$ 微米的红外光, 这就是掺钕钇铝石榴石激光。

在实际激光器中人造晶体的两个端面磨得光平并严格平行, 构成了谐振腔钕离子从E₂跳回E₁放出能量为hγ₀的光子, 如图5所示为转镜开关谐振腔。当光子运动方向不平行棒轴, 就从侧面逸出棒外, 只剩下轴向运动的一部分光子, 这些光子在两端面之间来回反射, 在往返过程中不断撞击处于E₂能级上大量钕离子, 使它们跳回E₁时放出更多能量为hγ₀的光子, 这些光子又去撞击其它钕离子这样链锁反应下去产生更多的光子, 结果轴向运动的光子数大量增加起来, 当钕离子产生的光子数远远超过被人造晶体吸收的光子数时, 谐振腔内就积累起来大量激光。激光即可从M₂射出具有严格的一致方向性的单色光。我们又采用了Q突变技术, 关于Q突变技术的原理和具体结构因篇幅关系此处不多叙述请参看文献[2] (P207~214)。使谐振腔在某一时刻t, Q突然增加, 瞬时发射激光, 可使激光脉宽达到30~50毫微秒, 功率可达几十亿瓦。

总之, 激光器与氙灯作光源相比较有下面的特点:

- (1) 高强度——亮度为氙灯的几亿倍甚至十几亿倍。
- (2) 单色性——光子波长都一样。

(3) 方向性强——可构成一束严格平行光束。

(4) 采用Q突变技术,可得到脉冲宽度为几十毫微秒数量级的激光。

更重要的是1.06微米激光的光子能量都是1.1电子伏特,比硅单晶的禁带宽度1.08电子伏特稍大一些,这种光子能量很接近硅中本征吸收的能量,吸收系数近于1,相当贯穿光深度可达几个毫米,这是普通光源所不具备的突出特点。因为具有这些特点,是测量低阻低寿命硅单晶的最理想的光源。根据上述特点(1)(2)解决了强光源的要求;(3)解决了测得均匀低寿命的问题;(4)解决了由于氙灯余辉测量低寿命的局限性。

(1) 激光光源激发能量的计算

调Q掺钕钇铝石榴石激光器,能量为0.5焦耳,脉冲宽度为100毫微秒,波长为1.06微米,它的脉冲光的强度以光子流密度的单位来表示在样品表面上的照度,以 ψ 表示样品表面处的光子流密度,则

$$\psi = \frac{E \lambda}{h c} \text{ [光子} \cdot \text{厘米}^{-2} \cdot \text{秒}^{-1}]$$

式中波长 $\lambda = 1.06$ 微米,普朗克常数 $h = 6.62 \times 10^{-27}$ 尔格·秒,光速 $c = 3 \times 10^{10}$ 厘米·秒⁻¹,E为样品表面处的照度

$$E = \frac{W \eta}{S \tau}$$

式中激光器能量 $W = 5 \times 10^6$ 尔格,经过平行扩束望远镜把激光扩束后其效率 η 为其0.5。

S照射在样品上的面积,我们测量的样品多为棒状,所以 $S = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 3.14$ 厘米²,脉冲宽度 $\tau = 100 \text{ ns} = 1 \times 10^{-7}$ 秒

$$\therefore E = \frac{5 \times 10^6 \times 0.5}{3.14 \times 10^{-7}} = 7.95 \times 10^{12} \text{ [尔格} \cdot \text{厘米}^{-2} \cdot \text{秒}^{-1}]$$

光子流密度

$$\psi = \frac{7.95 \times 10^{12} \times 1.06 \times 10^{-4}}{6.62 \times 10^{-27} \times 3 \times 10^{10}} \\ = 4.2 \times 10^{24} \text{ [光子} \cdot \text{厘米}^{-2} \cdot \text{秒}^{-1}]$$

实验结果,从一块2.5微秒的硅单晶样品表面上得到在样品表面处单位面积的总激发率为 1.3×10^{10} 厘米⁻²·秒⁻¹,这足以满足测试低阻低寿命的要求。

(2) 余辉问题

氙灯的余辉最高能达到微秒级,考虑到测准条件,要求单晶的寿命应为(3~5)倍光脉冲的余辉时间,因此用氙灯只能测量 >20 微秒样品的寿命值。而激光器采用Q突变技术,可以使光脉冲持续时间缩短到几十个毫微秒,从而可测量微秒级或更低的寿命值,较氙灯光源测寿命能低1~2个数量级。

(3) 均匀光的获得

激光器发射的能量是按高斯曲线分布的平行光,如果我们再通过光栏加以控制,照射到样品表面的光子流基本上是均匀分布的,因此可达到激发出来的非平衡载流子在晶体内是均匀分布。

如图6所示,经光栏控制,仅是a b部分通过,这部分光的照度较不加光栏时的c d部分照度要均匀得多。采用氙灯无论是“一”字形还是“U”字形都是难以实现均匀照射的。所以采用激光器测量结果保证了体内均匀寿命值的测试要求。

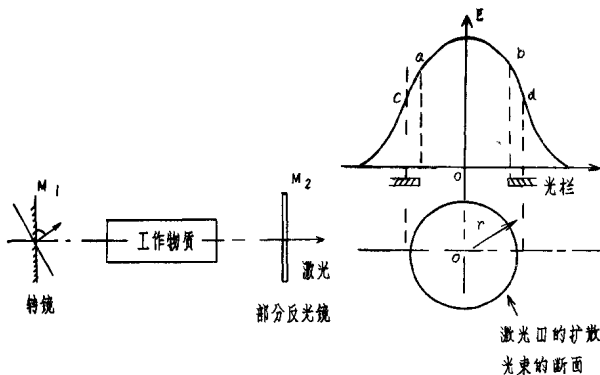


图5 转镜开关的谐振腔

图6 投射样品表面上光强度的分布

三、实验结果

利用我们完成的设备，如图7所示的方框图。

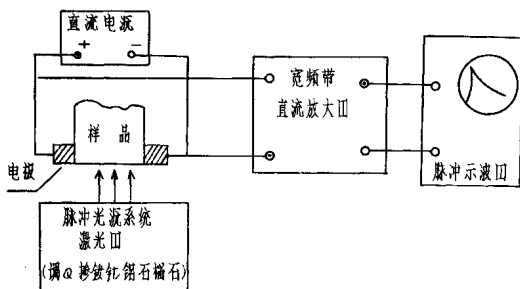


图7 直流光电导衰减寿命仪电路方框图

对北京605厂、天津半导体材料厂、天津卫东半导体材料厂提供的17块样品进行了测量。其结果见表（一）。

样品测试结果

编 号	导电类型	电阻率 Ωcm	注入比%	寿命 μs	备注指向
北京605 1	N	5~4.5	0.5	1220	<100>
北京605 2	N	5.1~4.8	0.18	209	<100>
北京605 3	N	7.6	0.37	20	<100>
北京605 4	P	1.8~2	1	40	<100>
北京605 5	N	3.8~4	0.35	100	<100>
卫东684	N	1.1	0.9	12	<111>
天津7-428	N	1.5	0.6	12	<111>
卫东685	N	1.7	1	90	<111>
天津6-300	N	6.3	0.3	24	<111>
卫东805	N	0.56	0.57	85	<111>
天津6-35	N	0.5	0.57		<111>
天津9-421	N	9	0.29	80	<111>
天津9-367	N	19	0.48	110	<111>
天津10-335	N	35	0.5	120	<111>
天津7-331	N	130	1	110	<111>
卫东285	N	0.52	0.7	2.5	<111>
卫东258	N	0.76	0.49	40	<111>

现以卫东285号样品为例,再进一步分析一下光强。此块样品的电阻率为 $0.3\sim 0.5$ 欧姆·厘米的N型硅单晶,测得寿命为2.5微秒,测量给出数据:样品两端的电压 $V_0=0.528$ 伏特,信号电压 $\Delta V_0=0.00365$ 伏特,由图(三)曲线查得平衡电子浓度 $n_0=2.3\times 10^{16}$ 厘米 $^{-3}$ 计算得 $\Delta P=0.007\times 2.3\times 10^{16}=1.6\times 10^{14}$ 厘米 $^{-3}$ 。假设均匀吸收,量子效率为1,不计表面反射得激发率为

$$R = \frac{\Delta P}{\tau} = \frac{1.6\times 10^{14}}{2.5\times 10^{-6}} = 6.4\times 10^{19} \text{ 厘米}^{-3}\cdot\text{秒}^{-1}$$

样品表面处的光子流密度是 $6.4\times 20\times 10^{-1}\times 10^{19}=1.3\times 10^{20}$ 光子·厘米 $^{-2}\cdot\text{秒}^{-1}$ 。上述结果,通过具体测量说明利用激光器,对电阻率为 10^{-1} 欧姆·厘米,寿命为1微秒左右的样品,光照后可以激发出 $10^{14}\sim 10^{15}$ 厘米 $^{-3}$ 的非平衡载流子,满足了测试要求。

四、结束语

1. 利用激光作为光源的光电衰退寿命测试仪,对测量低阻低寿命硅单晶,理论分析和实践证明是一种简单可行的方法。

2. 我们仅对直流光电导衰退法作了初步实验是较理想的,设想将激光用作高频光电导的光源也是可行的,因为无论是直流法还是高频法他们对测低阻低寿命的硅单晶,基本矛盾是一致的,都是注入比过低的问题。但是,高频法对测试样品不需要特殊加工(较直流法)测试工艺简便。这些特点是直流法无法比拟的,因此,将激光光源应用于高频法是可取的。

参 考 文 献

- (1) 半导体快报 14期 1962年
- (2) 激光物理学《激光物理学》编写组
上海人民出版社
- (3) J. S. Blakemore and K. C. Nomura
J. Appl. Phys. Vol 31, P753, 1960
- (4) I R E Standards, Proc. I R E 49 (1961) 1292
- (5) 半导体快报 15期 1960年

光学信息处理的混合系统

张以谟

由于通讯理论（频谱、滤波、卷积、相关及取样理论等）和光学理论相结合，形成“付立叶光学”，它是光学信息处理的基本理论。

透镜本身是一个付立叶变换器，特别是在前焦面放置透明片，透过率函数为 $f(x, y)$ ，用平行相干光照明，在其后焦面上可得严格的付立叶变换：

$$\text{(花体)} \quad F\{f(x, y)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-2\pi i(v_x x + v_y y)} dx dy$$

逆付立叶变换为

$$f'(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(v_x, v_y) e^{2\pi i(v_x x + v_y y)} dv_x dv_y$$

$$\text{式中, } F(v_x, v_y) = \text{(花体)} F\{f(x, y)\}, \quad f'(x, y) = \text{(花体)} F^{-1}\{F(v_x, v_y)\}.$$

付立叶变换的意义就是把 x, y 平面上（空间域）的振幅透过率分布变换为 v_x, v_y 平面（频率域上的空间频率分布（频率），或称付立叶谱）。

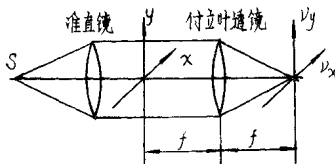


图 1

在 v_x, v_y 平面上 x, y 方向的空间频率可表示为

$$v_x = \frac{\cos \alpha}{\lambda}, \quad v_y = \frac{\cos \beta}{\lambda}$$

式中， $\cos \alpha$ 和 $\cos \beta$ 是频率为 v_x, v_y 的平面波传播方向的方向余弦。

根据付立叶变换的位移定理，若 $\text{(花体)} F\{g(x, y)\} = G(v_x, v_y)$ ，当图象函数平移时有

$$\text{(花体)} \quad F\{g(x-a, y-b)\} = G(v_x, v_y) e^{-2\pi i(v_x a + v_y b)}$$

即当输入函数在输入面内有平移时，其频谱反位相，有所变化，而振幅分布不变，或者说付立叶变换的模有“位移不变性”。

光学信息处理工作主要包括频谱分析, 空间滤波两个方面, 而空间滤波的应用主要是图像消模糊和图形识别。

光学处理有很高速度, 且是并行处理。而电子学 (包括计算机和电视等), 方法处理有高度灵活性。因此, 把二者结合起来, 保留光学的高速度, 以电子学的方法补充其灵活性的不足, 构成光学—电子学的混合处理系统, 是当前光学信息处理的发展方向之一。

下面对于混合处理的几种主要应用进行概括的讨论。

(一) 根据物体的特性可进行频谱分析

1. 物体的探测和分类: 现在国外已有频谱分析仪器, 其原理见图 2。光学系统在频率面上放置楔一环探测器, 由 32 个楔和 32 个环组成, 示意图见图 3, 其可同时检测物体频谱分布及方向性分布。将探测器新测得的信号输入到计算机中进行记录 and 分类。其每分钟可以分析几百帧图片。

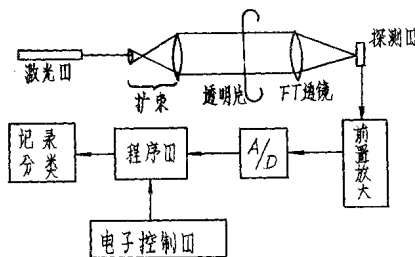


图 2

2. 根据物体的空间频谱特性可进行质量检验。有些物体, 例如针尖, 检验其频谱更方便, 被检测的面积小, 物体位置要求不严格, 便于自动检验。

(二) 空间滤波

在讨论混合处理前, 首先讨论光学空间滤波原理。

如图 4 所示, 在频谱面上放置滤波器, 改变通过系统的频谱, 以改变输出面的逆付立叶变换函数。

1. 简单滤波器

(1) 带通和带阻滤波器, 即使某一频带的频率通过或拦去某一频带的频率。

(2) 位相—振幅滤波器, 有把位相变化变为振幅分布的纹影法摄影, 以及把位相差变为对比差异的 Zernike 的相衬法观测。

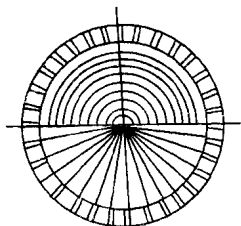


图 3

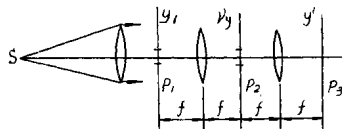


图 4

2. 非二进滤波器，即滤波器不是一个简单的圆环式圆盘等不透光物构成，而是带有一组透率函数的透明片。

例如微分滤波器，用以突出物体边缘。设输出面上的象函数为

$$f(x) = \int F(v) e^{2\pi i v x} dv$$

微分之，得

$$\frac{d}{dx} f(x) = \int i 2 \pi v F(v) e^{i 2 \pi v x} dx$$

如在频谱面放置滤波器，其函数为

$$H(v) = i 2 \pi v$$

便可得到对 $f(x)$ 的微分输出。

又如逆转滤波，设 $H_s(v)$ 为由模糊因素引起的传递函数，取滤波器函数为

$$H(v) = \frac{1}{H_s(v)}$$

置于频谱面上，在逆付立叶变换输出中可得消模糊后的图象。

3. 付立叶变换滤波器（全息滤波器）其可进行匹配滤波，对信息进行检测和识别。该种滤波器的制造原理见图 5，其滤波器函数为

$$H(v) = R^2 + 1 G(v) 1^2 + R G(v) e^{2\pi i v b} + R G^*(v) e^{-2\pi i v b}$$

今此滤波器与待处理函数 $f(x)$ 的频谱 $G(v)$ 重合，透过滤波器的频谱并作逆付立叶变换可得：

$$g(x) = R^2 f(x) + [g(x) * f(x)] + R [g(x+b) \otimes f(x-b)]$$

式中，符号 $*$ 为卷积， $\otimes$ 为相关， b 为参考光和物光中心之偏离。上式中前二项和直流分量有关，第三项为卷积项，位于 $x = -b$ ，第四项为相关项，位于 $x = b$ 。当 $f(x) = g(x)$ 时为自相关，有最大输出；当 $f(x) \neq g(x)$ 为互相关。

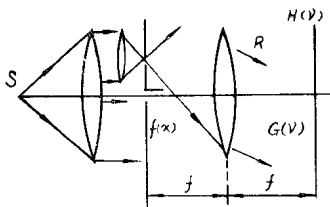


图 5

4. 复杂空间滤波器

前述简单滤波器多是由单个元件构成，而复杂空间滤波器多是由几个元件构成的系统，由其体现某种滤波函数。它的应用多是空间滤波和信号检测。

1. 空间滤波，其原理如图 6 所示。输入信号和输出信号之间有误差：

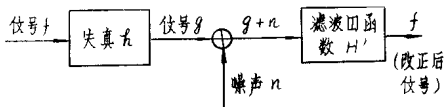


图 6

$$e(x, y) = f' - f$$

欲使输出 f' 尽可能接近输入 f ，或使其均方差为最小，可在频率域中方便地解决。首先可求其功率谱

$$P_e = \left\{ F \{ e(x, y) \} \right\}^2 = \left\{ F \{ n(x, y) \} \right\}^2 \left\{ H'(v_x, v_y) \right\}^2 + \left\{ F \{ f(x, y) \} \right\}^2 \left\{ 1 - H'(v_x, v_y) \right\}^2$$

或写为

$$P_e = |N|^2 |H'|^2 + |F|^2 (1 - HH')^2$$

对于不同的频率引入不同的叉重因子 $w(v_x, v_y)$ ，则均方差可写为

$$\sigma_e = \int w(v_x, v_y) P_e(v_x, v_y) dv_x dv_y$$

设 $w(v_x, v_y) = 1$ ，用变分法求最小值，可得滤波器函数为

$$H'(v_x, v_y) = \frac{H^*(v_x, v_y)}{|H|^2 + |N|^2 / |F|^2}$$